

Cenovo dostupná inerciálna navigácia pre integrované navigačné systémy

Miloš Soták, Václav Králík, František Kmec

Integrácia navigačných informácií predstavuje aktuálnu problematiku dosiahnutia vyššej presnosti požadovaných navigačných parametrov použitím viacerých, menej presných navigačných systémov.

Rozvoj v oblasti MEMS technológií prináša nové, komplexné a cenovo prístupné riešenia inerciálnych senzorov, vhodných pre integrované navigačné systémy s rozsiahlymi možnosťami použitia.

Úvod

Inerciálna navigácia je navigácia založená na nepretržitom vyhodnocovaní polohy navigovaného objektu s využitím senzorov citlivých na pohyb, tzn. gyroskopov a akcelerometrov, ktoré sú považované za primárne inerciálne senzory, alebo iných senzorov umiestnených na navigovanom objekte. Pomocou navigačného počítača a údajov zo senzorov sa nepretržite určuje poloha, orientácia, smer a rýchlosť pohybu bez externých zdrojov informácií o pohybe. Aktuálna poloha objektu sa vyhodnocuje na základe znalosti začiatočnej polohy a následného kontinuálneho merania zrýchlenia a smeru pohybu v referenčnej sústave. Slovo „inerciálny“ pochádza z pôvodného slova „inertia“, znamenajúceho zotrvačnosť, nedotknuteľnosť a neschopnosť pohybu. Princíp inerciálnej navigácie sa riadi zákonmi klasickej mechaniky definovanej Newtonom. V súčasnosti na vykonávanie trojrozmernej inerciálnej navigácie slúži inerciálny navigačný systém (INS), s ktorým sa najčastejšie môžeme stretnúť na palubách vojenských a civilných lietadiel, kde predstavuje primárny zdroj navigačných informácií. INS zahŕňa minimálne jeden navigačný počítač a platformu, resp. modul obsahujúci akcelerometre a gyroskopy. Z konštrukčného hľadiska rozdelujeme inerciálne navigačné systémy na platformové tzv. kardanové INS a bezplatformové tzv. strapdown systémy. Pri platformovom systéme sú inerciálne senzory upevnené na platforme, ktorá je inštalovaná v kardanovom závесе s tromi stupňami voľnosti s cieľom zachovania konštantnej priestorovej orientácie vo vopred definovaných smeroch (sever – juh, východ – západ a kolmo na pôsobenie zemskej tiaže), pričom kardanový záves je pevne spojený s konštrukciou navigovaného objektu. Pohyblivé mechanické časti týchto systémov majú za následok relatívne nízku spoľahlivosť voči bezplatformovým systémom. Bezplatformové systémy majú inerciálne senzory pevne spojené s konštrukciou objektu (zvyčajne v ťažisku), na ktorého navigáciu sú určené. Obidva typy INS sa skladajú z inerciálnej meracej jednotky a navigačného počítača.

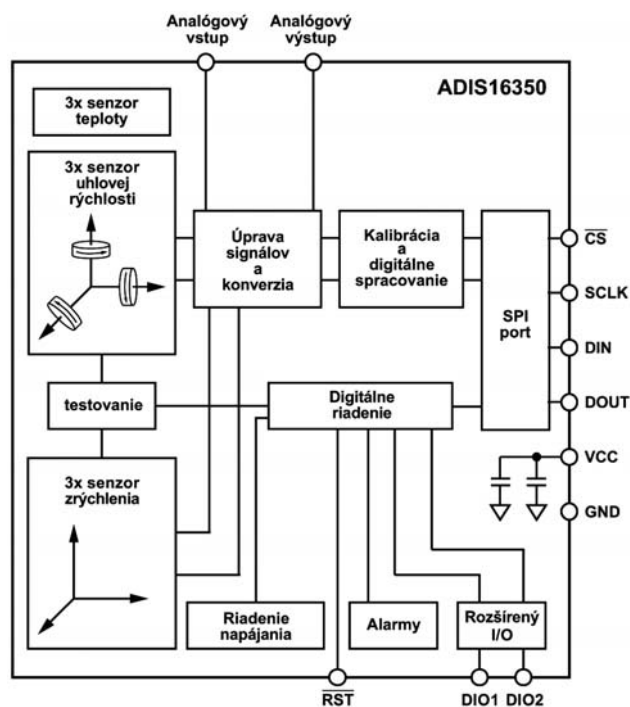
Inerciálna meracia jednotka

Základným prvkom každého INS je inerciálna meracia jednotka označovaná ako IMU (z anglického Inertial Measurement Unit). Sensory, ktorých výstup ovplyvňuje iba samotný pohyb objektu, na ktorom je IMU jednotka umiestnená, sa považujú za primárne senzory IMU jednotky. Primárnymi senzormi v inerciálnej navigácii sú senzory uhlovej rýchlosti, ktorých výstupné signály sa po integrácii využívajú na určenie orientácie v priestore, a akcelerometre, ktorých výstupné signály môžu byť po precíznom kompenzovaní gravitačného zrýchlenia a Coriolisovej sily integrované na rýchlosť a polohu. Bezplatformové systémy majú tieto senzory umiestnené do trojrozmerného súradnicového systému tak, aby každej osi navigovaného objektu zodpovedala os citlivosti akcelerometra a senzora uhlovej rýchlosti. Takáto inerciálna meracia jednotka má šesť stupňov voľnosti, tzn. umožňuje merať translačný a rotačný pohyb v 3 ortogonálnych osiach. Presnosť inerciálnych senzorov zohráva pri autonómnej navigácii kľúčovú úlohu. Chyby súčasných inerciálnych senzorov majú hodnotu približne 0,01 °/hod. pre gyroskopy a 100 µg pre akcelerometre. Uvedené chyby sa integrujú

v čase a spôsobujú chybu určovania polohy, ktorá je vyjadrená nepresnosťou merania za hodinu, pre moderné IMU je táto chyba približne 2 km/hod. Cena komerčnej high-end inerciálnej meracej jednotky je zhruba 100 000,- eur. Takéto vysokovýkonné a drahé IMU sú implementované len do inerciálnych navigačných systémov na špeciálne použitie, kde sa vyžaduje najvyššia možná presnosť. Pri menej náročných aplikáciách sa využívajú lacnejšie IMU, ktorých nižšia presnosť je kompenzovaná implementáciou do integrovaných navigačných systémov, v ktorých sa požadovaná presnosť dosahuje integráciou navigačných informácií z viacerých navigačných systémov. Medzi novinku v oblasti takýchto IMU patrí inerciálny senzor ADIS16350, ktorý získal ocenenie na podujatí Best of Sensors Expo 2007.

Inerciálny senzor ADIS16350

ADIS16350 iSensor™ je inerciálny senzor určený na meranie uhlových rýchlostí a zrýchlení v troch osiach. Tento senzor od firmy Analog Devices, Inc. je zložený z iMEMS® komponentov a obvodov signálového spracovania s cieľom vysoko integrovaného riešenia, ktoré umožňuje kalibrované digitálne inerciálne merania. Výstupné dáta senzora sú prispôbené na komunikáciu štandardom zbernice SPI, ktorá zaručuje konštrukčne jednoduché vstupno-výstupné rozhranie a komfort programovania. SPI zbernica sériového typu poskytuje adresný prístup k nameraným hodnotám jednotlivých senzorov uhlových rýchlostí, akcelerometrov, vnútorných teplomerov, k údajom o napájaní a k doplnkovému analógovému vstupu. Inerciálne senzory sú výrobcom precízne zarovnané v trojrozmernej pravouhlej sústave s garantovanou



Obr.1 Bloková schéma inerciálneho senzora [1]

presnosťou $\pm 0,05^\circ$ pre gyroskopy a $\pm 0,25^\circ$ pre akcelerometre. Zabudované obvody umožňujú vykonávať kalibráciu odchýlky a nastavenie citlivosti gyroskopov vo všetkých meraných osiach. Vnútna štruktúra senzora zabezpečuje riadenie dynamickej kompenzácie hlavných vplyvov pôsobiacich na MEMS snímače na zachovanie vysokej presnosti výstupu zo senzora bez nutnosti dodatočného testovania, ďalších obvodov alebo používateľského zásahu. Inerciálny senzor ADIS16350 je určený pre aplikácie navádzania, riadenia a stabilizácie telesa so šiestimi stupňami voľnosti v priestore. Senzor môže byť použitý na riadenie a analýzu pohybu, navigáciu a stabilizáciu telesa alebo obrazu v rôznych aplikáciách. Ako súčasť integrovaného navigačného systému je vhodný na použitie v oblasti robotiky na navigáciu a riadenie autonómnych robotov. V obvode senzora je implementovaný softvér na riadenie automatickej kalibrácie systémovej chyby, vzorkovania, digitálnej filtrácie, vnútorného testu snímačov, napájania, monitorovania stavu senzora a pomocného číslicového I/O portu.

Senzor uhlovej rýchlosti

ADIS16350 obsahuje tri senzory uhlovej rýchlosti, ktoré pracujú na princípe snímania sekundárnych vibrácií spôsobených vplyvom Coriolisovho zrýchlenia, ktoré vzniká pri pôsobení uhlovej rýchlosti na citlivý element kmitajúci v jednej osi. Pohyb citlivého elementu je presne definovaný a zaistovaný pomocou elektrostatického poľa. Jednotlivé módy sekundárnych vibrácií sa vyhodnocujú pomocou sústavy kondenzátorov, ktoré sa nachádzajú v rovnakej vrstve kremikového základu ako citlivý element.

Senzor zrýchlenia

Jadro senzora zrýchlenia, použitého v ADIS16350 predstavuje mikroskopická pružná lamela a platnička z polykryštalického kremika. Lamela je pružne zavesená nad povrchom platničky a spolu tvoria kapacitný snímač orientovaný v smere osi pôsobenia zrýchlenia. Pôsobením zrýchlenia v danej osi sa lamela vychýli z rovnovážneho stavu, čím dôjde k zmene vzdialenosti medzi lamelou a platničkou. To má za následok zmenu kapacity, ktorá sa vyhodnotí diferenčným kondenzátorom a príslušnými obvody sa upraví do požadovaného výstupného elektrického signálu.

Kalibrácia

Technická vyhotovenie senzora umožňuje zjednodušiť integračný proces snímača do systému prostredníctvom zabudovanej kalibrácie. Toto kalibrovanie poskytuje korekcie pre začiatkový odklon a citlivosť snímača, kolísanie napájania, osové zarovnanie a lineárne zrýchlenie (pre gyroskopy).

Štruktúra riadiaceho registra

ADIS16350 poskytuje konfigurovateľnú kontrolu väčšiny kritických prevádzkových parametrov pomocou dvojitého pamäťového registra. Prvý SRAM register závislý od napájania je určený pre všetky operácie (stav senzora, jednotlivé namerané hodnoty atď.). Druhý flash register je určený na uchovanie konfiguračných nastavení. Informácie z tohto registra sa automaticky po pripojení senzora na napájanie alebo po reštartovaní načítavajú do SRAM registra.

Rozšírené vstupno-výstupné rozhrania

Prednosťou tohto senzora je možnosť využitia doplnkového 12-bitového analógovo-číslcového prevodníka. Výstup tohto prevodníka (v rozsahu 0 V až 2,5 V) možno priamo monitorovať prostredníctvom AUX_ADC registra. Ďalším doplnkovým výstupným rozhraním je analógový výstup 12-bitového číslicovo-analógového prevodníka, ktorý je ovládaný AUX_DAC registrom (v rozsahu 0 V až 2,5 V). K dispozícii sú tiež dva logické vstupy, resp. výstupy DIO1 a DIO2.

Základné prevádzkové parametre inerciálneho senzora

Rozsah teplôt okolitého prostredia je -40°C až $+85^\circ\text{C}$, napájanie IMU 5 V, dynamický rozsah senzorov uhlových rýchlostí $\pm 75^\circ/\text{s}$, $\pm 150^\circ/\text{s}$, $\pm 300^\circ/\text{s}$, dynamický rozsah akcelerometrov $\pm 10\text{ g}$, frekvencia obnovy dát (uhlových rýchlostí a zrýchlení v registroch) 819,2 vzoriek za se-

kundu, šírka pásma 350 Hz, stabilita začiatkovej odchýlky $0,015^\circ/\text{s}$ (1σ), náhodná prechádzka (random walk) $4,2^\circ/\text{h}^{1/2}$ (gyroskopy), $0,7\text{ mg}$ (1σ) a $2\text{ m/s/h}^{1/2}$ (akcelerometre), pre redukciu šumov možno konfigurovať zabudovaný Bartlett window FIR filter.

Navigačný počítač

Jadro inerciálneho navigačného systému tvorí navigačný počítač. Ten spracúva namerané údaje z inerciálnej meracej jednotky a vytvára informácie o uhlovej polohe, rýchlosti a polohe navigovaného objektu na základe známych začiatkových podmienok. Merané údaje z gyroskopov predstavujú vektor uhlovej rýchlosti navigovaného objektu voči inerciálnej súradnicovej sústave označenej indexom „i“ a merané v jednotlivých osiach karteziánskej súradnicovej sústavy navigovaného objektu, označenej indexom „b“ (z anglického body).

$$\omega_{ib}^b = [\omega_{ib}^{bx}, \omega_{ib}^{by}, \omega_{ib}^{bz}]^T \quad (1)$$

Viacerými matematickými úpravami [2] a integráciou uhlových rýchlostí dostávame informáciu o uhlovej polohe navigovaného objektu voči referenčnej sústave (kurz, náklon, sklon, resp. transformačnú maticu alebo kvaternióny). Údaje merané trojzložkovým akcelerometrom predstavujú vektor zrýchlení meraných v osiach navigovaného objektu.

$$\mathbf{a}^b = [a^{bx}, a^{by}, a^{bz}]^T \quad (2)$$

Po prvotnom spracovaní sa tieto údaje transformujú do referenčnej sústavy, vykonajú sa kompenzácie o gravitačné a Coriolisove zrýchlenie a následne sa vykonáva dvojitá integrácia. Prvou integráciou sa získavajú informácie o rýchlosti navigovaného objektu v referenčnej sústave a druhou integráciou informácie o polohe objektu. Na prvý pohľad jednoduchý princíp navigačného počítača však zahŕňa deväť diferenciálnych rovníc, resp. tri diferenciálne rovnice vo vektorovom tvare. Rovnica (3) predstavuje matematický model INS pracujúceho v navigačnej súradnicovej sústave, t. j. zvolená referenčná sústava je navigačná s orientáciou osí sever – východ – dole (z anglického North-East-Down).

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{r}}^n \\ \dot{\mathbf{v}}_E^n \\ \dot{\mathbf{C}}_b^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_E^n \\ \mathbf{C}_b^n \cdot \mathbf{a}^b - (2 \cdot \boldsymbol{\Omega}_{ie}^n + \boldsymbol{\Omega}_{en}^n) \mathbf{v}_E^n + \mathbf{g}^n - \boldsymbol{\Omega}_{ie}^n \cdot \boldsymbol{\Omega}_{ie}^n \cdot \mathbf{r}^n \\ \mathbf{C}_b^n \cdot [(\boldsymbol{\omega}_{ib}^b - \mathbf{C}_b^n \cdot (\boldsymbol{\omega}_{en}^n + \mathbf{C}_e^n \cdot \boldsymbol{\omega}_{ie}^e))] \times \end{bmatrix} \quad (3)$$

kde $\mathbf{r}^n = [x^n, y^n, z^n]^T$ – polohový vektor,

$\mathbf{v}^n = [v^{nx}, v^{ny}, v^{nz}]^T$ – vektor rýchlosti,

\mathbf{g}^n – vektor gravitačného zrýchlenia,

\mathbf{a}^b – zrýchlenie merané akcelerometrami,

$\boldsymbol{\omega}_{ib}^b$ – uhlová rýchlosť meraná gyroskopmi,

\mathbf{C}_b^n – transformačná matica,

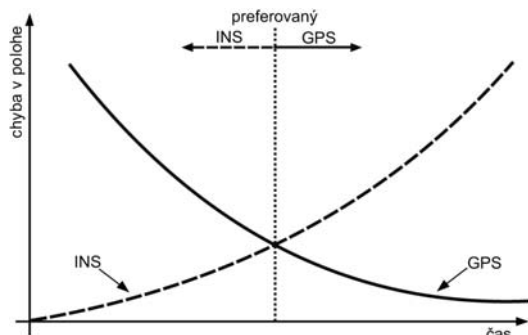
$\boldsymbol{\Omega}_{ie}^n = [\boldsymbol{\omega}_{ie}^n \times]$ – antisymetrická matica uhlovej rýchlosti Zeme,

$\boldsymbol{\Omega}_{en}^n = [\boldsymbol{\omega}_{en}^n \times]$ – antisymetrická matica uhlovej rýchlosti medzi zemskou súradnicovou sústavou a navigačnou súradnicovou sústavou vyjadrená v navigačnej súradnicovej sústave.

Integrované navigačné systémy

Napriek tomu, že ADIS16350 má vo svojej triede vynikajúce parametre, nedosahuje parametre súčasných drahých komerčných high-end IMU obsahujúcich laserové gyroskopy, a preto nemôže byť použitý ako IMU v inerciálnych navigačných systémoch, ktoré pracujú ako primárne zdroje navigačných informácií. Svojou cenou cca 300,- eur a technickým riešením predstavuje bezkonkurenčne vhodné IMU pre menej presné (low-cost) INS použité ako súčasť integrovaného navigačného systému. Integráciou menej presných INS s iným zdrojom navigačných informácií, napr. s lacným GPS prijímačom, získame cenovo výhodný a presný navigačný systém, ktorý je širokospektrálne použiteľný. Vlastnosti jednotlivých navigačných systémov INS a GPS sú temer ideálne komplementárne, a tak sa vzájomne dopĺňajú. INS disponuje vysokou presnosťou navigačných informácií počas krátkeho času, jeho hlavnou nevýhodou je však neohraničený nárast chyby v polohe vzhľadom na

čas. Tento nárast je spôsobený integráciou chýb gyroskopov a akcelerometrov. GPS má naopak nižšiu krátkodobú presnosť, ale chyba sa s časom nezväčšuje, je v čase ohraničená. Komplementárnosť týchto dvoch systémov sa prejavuje v schopnosti poskytnutia navigačných informácií počas krátkych aj dlhých navigačných aplikácií. INS poskytuje kompletne navigačné informácie (poloha, rýchlosť a uhlová poloha) s vysokou rýchlosťou a v reálnom čase, aj keď je GPS signál nedostupný alebo rušený. GPS zase disponuje relatívne konštantnou presnosťou nezávislou od času v okolí celej Zeme a jeho použitie dovoľuje doplnkovú kalibráciu IMU, zarovňovanie, odhad a korekciu chýb inerciálneho navigačného systému.

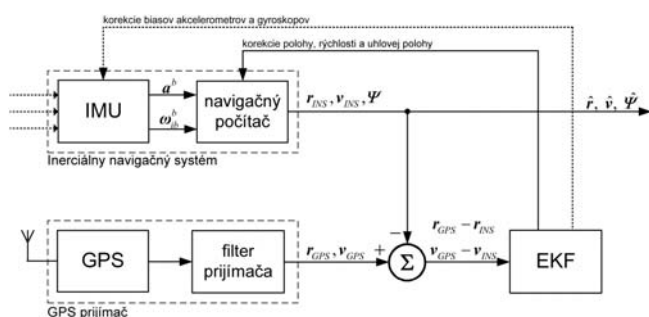


Obr.2 Porovnanie vývoja chýb v čase INS a GPS

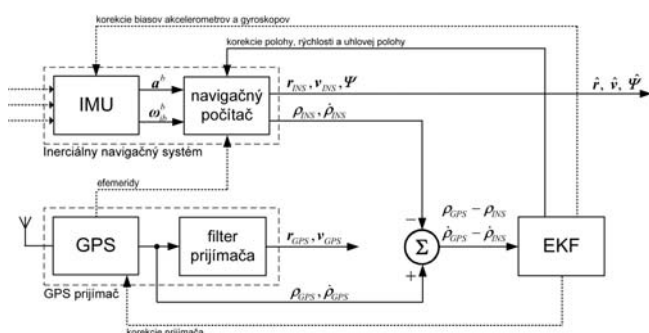
Integrovaním týchto systémov získame navigačný systém s vysokou presnosťou pri určení polohy a rýchlosti počas dlhého času, s vysokou dynamikou meraných informácií, s relevantnou navigačnou informáciou aj počas straty GPS signálu a presnými navigačnými informáciami o uhlovej polohe navigovaného objektu. Dosiahnutie uvedených kladných vlastností sa realizuje implementovaním vhodného integračného mechanizmu, ktorý dokáže plne využiť všetky výhody INS a GPS s použitím vhodnej integračnej architektúry. V súčasnosti existuje viacero integračných architektúr, ktoré umožňujú fúziu navigačných informácií z INS a GPS. Integračné architektúry môžeme podľa hĺbky integrácie [5] rozdeliť do štyroch skupín:

- neviazané systémy,
- voľne viazané systémy,
- pevne viazané systémy,
- hlboko alebo ultra viazané systémy.

V rámci jednej architektúry možno vykonávať integráciu aj s inými systémami (napr. odometer, kompas, výškomer), čo prináša ďalšie zvýšenie presnosti.



Obr.3 Integrácia INS/GPS – voľne viazané systémy [2]



Obr.4 Integrácia INS/GPS – pevne viazané systémy [2]

Záver

Integrácia viacerých navigačných systémov je zložitý proces [2, 3, 4, 6], v súčasnosti však dostupnosťou kvalitných a cenovo prístupných senzorov, akým je aj ADIS16350 a jeho tepelne kalibrovaný ekvivalent ADIS16355, predstavuje vhodnú a dostatočne presnú alternatívu k druhým a super presným primárnym navigačným systémom.

Článok vznikol za podpory projektu *Integrované navigačné systémy ŠPP 096_06-RO02_RU21-240*.

Literatúra

[1] ADIS16350 Tri Axis Inertial Sensor – Datasheet, http://www.analog.com/UploadedFiles/Data_Sheets/ADIS16350_16355.pdf

[2] SOTÁK, M. a kol.: Integrácia navigačných systémov. 1. vyd. Košice 2006. 344 s. ISBN 80-969619-9-3.

[3] BAR-SHALOM, Y., LI, X. R., KIRUBARAJAN, T.: Estimation with Applications to Tracking and Navigation: Theory Algorithms and Software. ISBN: 0-471-41655-X, 2001.

[4] GREWAL, M. S., ANDREWS, A. P., WEILL, L. R.: Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration. ISBN 0-471-35032-X, 2001.

[5] SCHMIDT, G. T., PHILLIPS R. E.: INS/GPS Integration Architectures, RTO NATO EN-SET-064 Advances in Navigation Sensors and Integration Technology, 2004.

[6] FARELL, J. A., BARTH, M.: The Global Positioning System&Inertial Navigation. MCGraw-Hill, 1998. ISBN 0-07-022045-X.

Ing. Miloš Soták, PhD.

Ing. Václav Králik, PhD.

Ing. František Kmec, PhD.

Akadémia ozbrojených síl gen. M. R. Štefánika

Demänová 393, 03101 Liptovský Mikuláš

e-mail: milos.sotak@gmail.com

vaclav.kralik@gmail.com

frantisek.kmec@gmail.com